



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11) Veröffentlichungsnummer: 0 453 977 A2

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer: 91106293.3

(51) Int. Cl. 5: G06F 15/70

(22) Anmeldetag: 19.04.91

(30) Priorität: 26.04.90 DE 4013309

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
30.10.91 Patentblatt 91/44

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
CH DE FR GB LI

(71) Anmelder: Firma Carl Zeiss

W-7920 Heidenheim (Brenz)(DE)

(84) CH DE FR LI

Anmelder: CARL ZEISS-STIFTUNG HANDELND  
ALS CARL ZEISS

W-7920 Heidenheim (Brenz)(DE)

(84) GB

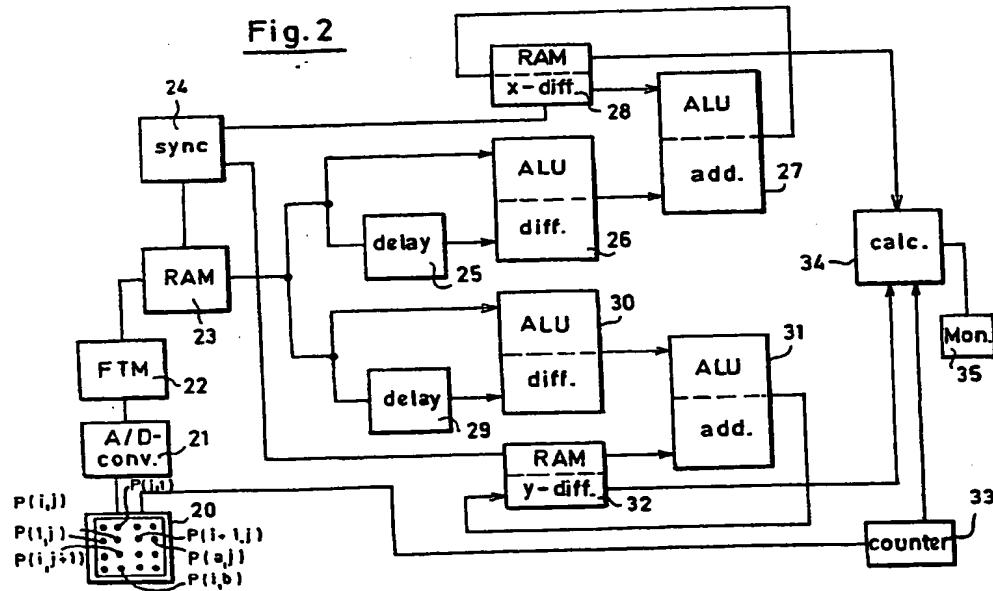
(72) Erfinder: Freischlad, Klaus, dr.  
Brandweg 4  
W-7080 Aalen(DE)

### (52) Verfahren und Anordnung zur optischen Untersuchung von Prüflingen.

(57) Beschrieben sind Verfahren und Anordnungen zur optischen Untersuchung von Prüflingen, die eine schnelle Mittelung über eine Vielzahl von Kamerabildern in Videoechtzeit ermöglichen. Eine Kamera (9, 18) nimmt ein Interferogramm oder das Bild eines projizierten Streifenmusters auf. Anschließend werden die Differenzen der Phasenwerte benachbarter

Datenpunkte in Differenzierern (26, 30) modulo- $2\pi$  berechnet und diese Differenzen mehrerer Kamerabilder in Addierern (27, 31) aufaddiert. Erst nachdem diese Differenzen der Phasenwerte der gewünschten Anzahl an Kamerabildern aufaddiert sind, wird eine einzige Sprungstellenbeseitigung durchgeführt.

Fig. 2



BEST AVAILABLE COPY

EP 0 453 977 A2

nigten Phasenkarten, also die Sprungstellenbeseitigung, ist jedoch ein relativ zeitaufwendiger Prozeß, weil für jeden Punkt des Phasenbildes mindestens eine Integration durchzuführen ist. Dieser Rechenaufwand bei der Sprungstellenbeseitigung ist noch wesentlich größer, wenn die zunächst berechneten Phasenwerte in verschiedenen Punkten des Phasenbildes untereinander noch auf ihre Konsistenz untersucht werden, wie dies in J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 4, No. 1 (1987) beschrieben ist. Dieser Zeitaufwand wächst bei der Mittelung proportional zur Anzahl der Phasenbilder an, über die gemittelt wird. Für eine deutliche Reduzierung der statistischen Fehler sind deshalb sehr lange Meß- bzw. Rechenzeiten in Kauf zu nehmen, da die statistischen Fehler bekanntlich umgekehrt proportional zur Quadratwurzel der Anzahl der gemittelten Phasenbilder abnehmen.

Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren der eingangs genannten Art zu schaffen, daß eine Mittelung über eine Vielzahl von Phasenbildern bei möglichst kurzer Meßzeit ermöglicht.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß vor der weiteren Auswertung die modulo  $2\pi$  dargestellten Differenzen der Phasenwerte benachbarter Datenpunkte mehrerer Phasenbilder aufsummiert werden, und daß die weitere rechnerische Auswertung anhand dieser aufsummierten Differenzen erfolgt.

Im Gegensatz zu dem bekannten Verfahren werden also nicht die aus mehreren Phasenbildern berechneten Phasenwerte nach der Sprungstellenbeseitigung im jedem Datenpunkt aufsummiert. Vielmehr werden die modulo  $2\pi$  dargestellten Differenzen der Phasenwerte jeweils benachbarter Datenpunkte von mehreren Phasenbildern aufsummiert. Die zeitaufwendige Sprungstellenbeseitigung zur Berechnung der Phasenkarte braucht deshalb unabhängig von der Anzahl der Phasenbilder, über die gemittelt wird, nur ein einziges Mal durchgeführt zu werden.

Das Aufsummieren der Differenzen der Phasenwerte kann in Video-Echtzeit erfolgen. Da die Sprungstellenbeseitigung wesentlich langsamer erfolgt, können diese Differenzen von vielen Phasenbildern aufsummiert werden, ohne die gesamte Meßzeit wesentlich zu vergrößerem. Zur Sprungstellenbeseitigung werden die aufsummierten Differenzen der Phasenwerte über das Raster von Datenpunkten integriert.

Vorzugsweise werden die Integrale, nachdem die Integrationsprozesse der Sprungstellenbeseitigung durchgeführt sind, in jedem Datenpunkt durch die Anzahl der aufsummierten Phasenbilder normiert. Es ist dann sichergestellt, daß aus der Phasenkarte unabhängig von der Anzahl der aufsummierten Phasenbilder die richtige Kontur der Ob-

jeoberfläche ermittelt wird, und daß sich bei der Normierung entstehende Rundungsfehler nicht fortpropagieren können.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann angewandt werden, wenn das von der Kamera aufgenommene Muster ein Interferogramm ist. Der Meßstrahl kann sowohl am der Oberfläche des Prüflings reflektiert sein, als auch durch einen transparenten Prüfling transmittiert sein.

Das von der Kamera aufgenommene Muster kann jedoch auch eine auf den Prüfling projizierte periodische Helligkeitsverteilung sein, die entweder in Transmission oder in diffuser Reflexion von der Kamera aufgenommen wird.

Darüber hinaus kann die Kamera das Muster sowohl entlang einer einzigen Zeile als auch entlang einer Vielzahl von Zeilen aufnehmen. Die durch die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens erzielte Zeiter sparnis ist jedoch im letzten Fall, wenn ein zweidimensionales Bild aufgezeichnet wird, wesentlich größer, da die Anzahl der auszuwertenden Datenpunkte ebenfalls wesentlich größer ist.

Wenn die Kamera das Muster entlang einer Vielzahl von Zeilen aufnimmt, erfolgt die Auswertung auf einem zweidimensionalen Raster von Datenpunkten. Es werden dann sowohl die Differenzen der Phasenwerte zeilenweise benachbarter Datenpunkte als auch die Differenzen der Phasenwerte spaltenweise benachbarter Datenpunkte gebildet und jeweils modulo  $2\pi$  dargestellt. Dieser Vorgang wird entsprechend der gewünschten Anzahl an Phasenbildern wiederholt, wobei die modulo  $2\pi$  dargestellten Differenzen der Phasenwerte zeilen- und spaltenweise benachbarter Datenpunkte, die aus jedem Phasenbild berechnet werden, jeweils zu den entsprechenden bisherigen Werten hinzuge addiert werden.

Zur Berechnung der Phasenkarte werden dann Wegintegrale über diese aufsummierten Differenzen der Phasenwerte berechnet und die Werte der Wegintegrale durch die Anzahl der aufsummierten Kamerabilder dividiert.

Das Aufsummieren oder Mitteln der Differenzen der Phasenwerte kann prinzipiell durch ein Programm im einem Rechner erfolgen.

Besonders vorteilhaft ist jedoch eine hardwaremäßige digitalelektronische Anordnung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Diese zeichnet sich durch eine sehr hohe Geschwindigkeit aus.

Eine solche hardwaremäßige Anordnung besteht aus einer Zeilenkamera, die das Muster entlang einer Geraden aufnimmt. Die Ausgangssignale der Kamera in jedem Bildpunkt werden mit einer vorgegebenen Frequenz ausgelesen und digitalisiert. Aus den digitalisierten Ausgangssignalen werden Phasenwerte berechnet, die den beiden Ein-

bestimmt werden. Genauer gesagt, die berechneten Phasenwerte liegen zwischen  $-\pi$  und  $+\pi$ . Überschreitet die Phasendifferenz zwischen dem beiden interferierenden Teilstrahlengängen (5, 6) an einer Stelle die Zahl  $\pi$ , so weist das berechnete Phasenbild an dieser Stelle eine Sprungstelle auf, an der die Differenz der Phasenwerte  $w(x, y)$  benachbarter Punkte des Phasenbildes betragsmäßig größer als  $\pi$  ist.

Die in der Figur 1b dargestellte Anordnung hat einen Kondensator (12), der aus dem Licht einer Lichtquelle (11) einen parallelen Strahlengang (13) erzeugt. Der parallele Lichtstrahl (13) durchleuchtet ein Gitter (14) mit einer cosinus-förmigen Transmissions-Charakteristik. Der durch das Gitter (14) räumliche modulierte Lichtstrahl wird über ein Raumfrequenzfilter (15) telezentrisch unter einem Winkel ( $\alpha$ ) zur Normalen (n) der Prüflingsoberfläche (16) auf die Prüflingsoberfläche (16) projiziert.

Eine Kamera (18) nimmt ein Bild des auf die Objektoberfläche (16) projizierten Helligkeitsmusters über eine telezentrische Empfangsoptik (17) senkrecht zur Prüflingsoberfläche (16) auf.

Die Konturen der Prüflingsoberfläche (16) bewirken eine Verformung des Helligkeitsmusters, d.h. je nach der Form der Prüflingsoberfläche (16) haben Punkte gleicher Lichtintensität auf der Kamera (18) größere oder geringere Abstände. Die Stärke der Verformung hängt von dem Winkel ( $\alpha$ ) zwischen der Einfallsrichtung des Streifenmusters und der Normalen (n) der Prüflingsoberfläche (16) ab.

Das von der Kamera (18) aufgenommene Bild ändert sich bei einer Verschiebung des Prüflings (16) parallel zu seiner Flächennormalen (n) um ganzzahlige Vielfache des Konturebenenabstandes (h) nicht. Deshalb können auch hier bei einer Auswertung des Kamerabildes die Konturen der Prüflingsoberfläche (16) nur bis auf ein ganzzahliges Vielfaches des Konturebenenabstandes (h) ermittelt werden. In Analogie zur Interferometrie ordnet man den Konturen der Prüflingsoberfläche (16) der Tiefe (D) Streifenphasen  $\Delta w_s = 2\pi D/h$  zu. Die Streifenphasen lassen sich wie in der Interferometrie auch nur bis auf ein ganzzahliges Vielfaches der Zahl  $2\pi$  aus den Bildern der Kamera (18) berechnen.

Die Anordnung nach Figur 2 hat eine CCD-Kamera (20), die das mit einer Anordnung nach der Figur 1a oder Figur 1b erzeugte Muster auf einem zweidimensionalen Raster von (a x b) Datenpunkten ( $P(i, j)$ ) aufnimmt. Dabei ist (a) die Anzahl der Spalten und (b) die Anzahl der Zeilen des Sensors der Kamera (20). Die Kamera hat insgesamt 512 Zeilen und 512 Spalten, jedoch sind hier lediglich 4 Zeilen und 4 Spalten dargestellt. Die in den Datenpunkten ( $P(i, j)$ ) gemessenen Intensitätswerte werden in einem Analog-Digital-Wandler (21) auf je-

weils 8 Bit-Datenbreite digitalisiert.

Aus den digitalisierten Intensitätswerten werden nach der räumlichen Fourier-Transformations-Methode in einer Recheneinheit (22) die zugehörigen Phasenwerte bis auf ein ganzzahliges Vielfaches der Zahl  $2\pi$  berechnet. Diese Phasenwerte liegen alle innerhalb des Intervales  $-\pi$  und  $+\pi^*$  (1-1/128). Die Fourier-Transformations-Methode ist beispielsweise in der oben zitierten Dissertation von B. Dörband beschrieben. Auf sie braucht deshalb nicht näher eingegangen zu werden.

Die in der Recheneinheit (22) berechneten Phasenwerte  $w(P(i, j))$  jedes Datenpunktes ( $P(i, j)$ ) der Kamera werden in einem Zwischenspeicher (23) als Phasenbild gespeichert. Der Zwischenspeicher (23) wird mit einer festen Frequenz, die durch eine Synchronisationseinheit (24) vorgegeben ist, seriell ausgelesen.

Die in dem Zwischenspeicher (23) gespeicherten Phasenwerte  $w(P(i, j))$  werden den beiden Eingängen einer ersten arithmetisch logischen Einheit (ALU) (26) zugleitet. Diese (ALU) ist als Differenzierer ausgelegt, d.h., sie bildet jeweils die Differenz zwischen den beiden Eingangssignalen.

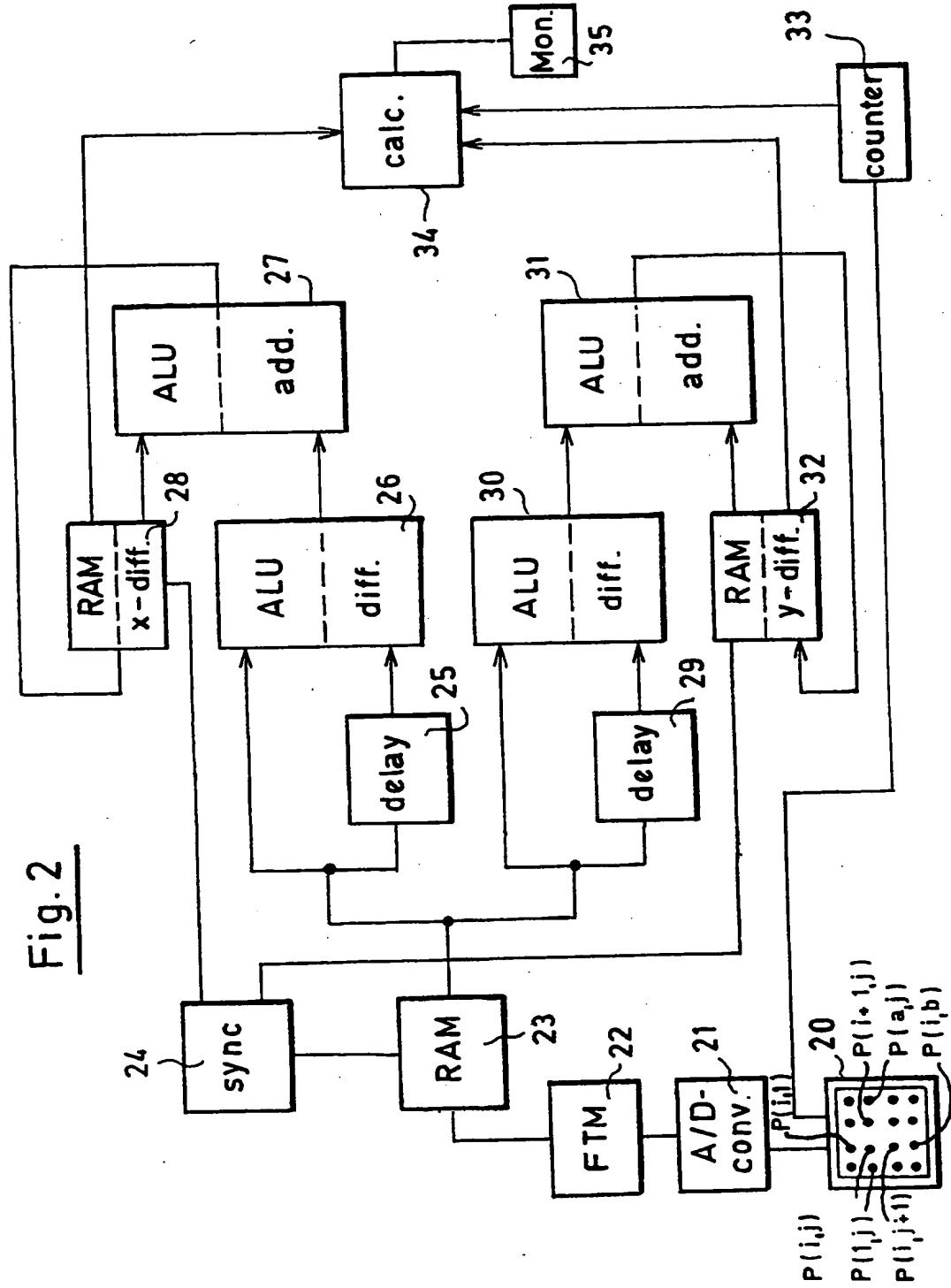
In einem der beiden Eingänge der ersten ALU (26) ist eine Verzögerungsleitung (25) vorgesehen, deren verzögernde Wirkung gerade eine Periode der durch die Synchronisationseinheit (24) vorgegebenen Frequenz beträgt. Diese erste ALU (26) subtrahiert deshalb die Phasenwerte zweier benachbarter Datenpunkte ( $P(i, j)$ ,  $P(i + 1, j)$ ) derselben Zeile der Kamera (20).

Die Ausgangssignale dieser ersten ALU (26) werden in derselben Datenbreite von 8 Bit dargestellt, wie die Eingangssignale. Dies entspricht im mathematischen Sinne einer modulo- $2\pi$ -Darstellung der von dieser ersten ALU (26) berechneten Differenzen, d.h. die Differenzen haben ebenfalls Werte zwischen  $-\pi$  und  $\pi^*$  (1 - 1/128). Erst im Eingang einer zweiten ALU (27), einem Addierer, werden diese Differenzen auf 16 Bit-Datenbreite transformiert.

Dem zweiten Eingang der Additions-ALU (27) sind die Ausgangssignale eines ersten Bildspeichers (28) zugeführt. Diese Signale haben bereits eine Datenbreite von 16 Bit. Der erste Bildspeicher (28) wird synchron zum Zwischenspeicher (23) seriell ausgelesen. Die Ausgangssignale der Additions-ALU (27) werden in dem ersten Bildspeicher (28) wieder mit 16 Bit-Datenbreite abgespeichert.

Parallel zur ersten ALU (26) ist eine dritte ALU (30) vorgesehen, die ebenfalls als Differenzierer ausgelegt ist, und deren beiden Eingängen ebenfalls die Ausgangssignale des Zwischenspeichers (23) zugeführt sind. Jedoch ist in einem der Eingänge dieser dritten ALU (30) eine Verzögerungsleitung (29) vorgesehen, deren verzögernde Wirk-

- Auswertung die modulo  $2\pi$  dargestellten Differenzen der Phasenwerte benachbarter Datenpunkte ( $P(i)$ ,  $P(i+1)$ ) mehrerer Phasenbilder aufsummiert werden und daß die weitere rechnerische Auswertung anhand dieser aufsummierten Differenzen erfolgt.
- 5
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur weiteren rechnerischen Auswertung die aufsummierten Differenzen in einem Rechner (34) über das Raster von Datenpunkten ( $P(i)$ ) integriert werden.
- 10
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Integral der aufsummierten Differenzen durch die Anzahl der aufsummierten Phasenbilder normiert wird.
- 15
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-3, dadurch gekennzeichnet, daß das von der Kamera (9) aufgenommene Muster ein Interferogramm ist.
- 20
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß das von der Kamera (9) aufgenommene Muster ein Interferogramm des an der Objektoberfläche (7) und des an einem Oberflächenstandard (6) reflektierten Lichts ist.
- 25
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-3, dadurch gekennzeichnet, daß das von der Kamera (18) aufgenommene Muster eine auf den Prüfling (16) projizierte periodische Helligkeitsverteilung ist.
- 30
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-3, dadurch gekennzeichnet, daß das von der Kamera (18) aufgenommene Muster auf die Prüflingsoberfläche (16) projiziert und durch diese transmittiert ist.
- 35
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-7, dadurch gekennzeichnet, daß das von der Kamera (20) aufgenommene Muster ein zweidimensionales Raster von Datenpunkten ( $P(i, j)$ ) ist, daß sowohl die Differenzen der Phasenwerte zeilenweise benachbarter Datenpunkte ( $P(i, j)$ ,  $P(i+1, j)$ ) als auch die Differenzen der Phasenwerte spaltenweise benachbarter Datenpunkte ( $P(i, j)$ ,  $P(i, j+1)$ ) gebildet und jeweils modulo  $2\pi$  dargestellt werden und daß die modulo  $2\pi$  dargestellten Differenzen mehrerer Phasenbilder in jedem Datenpunkt aufsummiert werden.
- 40
9. Anordnung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch, eine Kamera (20) zur Aufnahme des Musters, eine
- 45
- 50
- 55
- Recheneinheit (22) zur Berechnung der Phasenwerte des Musters aus den Ausgangssignalen der Kamera (20), einen Differenzierer (26) zur Bildung der Differenzen der Phasenwerte benachbarter Datenpunkte, einen Bildspeicher (28) zur Speicherung der von dem Differenzierer (26) gebildeten Differenzen der Phasenwerte, sowie ein Addierer (27) zur Bildung der Summe aus den in Bildspeicher (28) abgespeicherten Differenzen der Phasenwerte eines ersten Phasenbildes und den von dem Differenzierer (26) gebildeten Differenzen der Phasenwerte benachbarter Datenpunkte eines zweiten Phasenbildes.
10. Anordnung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Kamera (20) eine zweidimensionale Sensorfläche hat, daß ein zweiter Differenzierer (30) zur Bildung der Differenzen der Phasenwerte spaltenweise benachbarter Datenpunkte vorgesehen ist, daß ein zweiter Bildspeicher zur Abspeicherung der von dem zweiten Differenzierer (30) gebildeten Differenzen der Phasenwerte, sowie ein zweiter Addierer (31) zur Bildung der Summe aus den in zweiten Bildspeicher abgespeicherten Differenzen der Phasenwerte eines ersten Phasenbildes und den von dem zweiten Differenzierer (30) gebildeten Differenzen der Phasenwerte spaltenweise benachbarter Datenpunkte eines weiteren Phasenbildes vorgesehen sind.

Fig. 2



(19) Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11) Veröffentlichungsnummer: 0 453 977 A3

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer: 91106293.3

(51) Int. Cl. 5: G06F 15/70, G01B 11/24

(22) Anmeldetag: 19.04.91

(30) Priorität: 26.04.90 DE 4013309

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
30.10.91 Patentblatt 91/44

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
CH DE FR GB LI

(85) Veröffentlichungstag des später veröffentlichten  
Recherchenberichts: 06.07.94 Patentblatt 94/27

(71) Anmelder: Firma Carl Zeiss

D-73446 Oberkochen(DE)

(84) CH DE FR LI

(71) Anmelder: CARL ZEISS-STIFTUNG HANDELND  
ALS CARL ZEISS

D-89518 Heidenheim (Brenz)(DE)

(84) GB

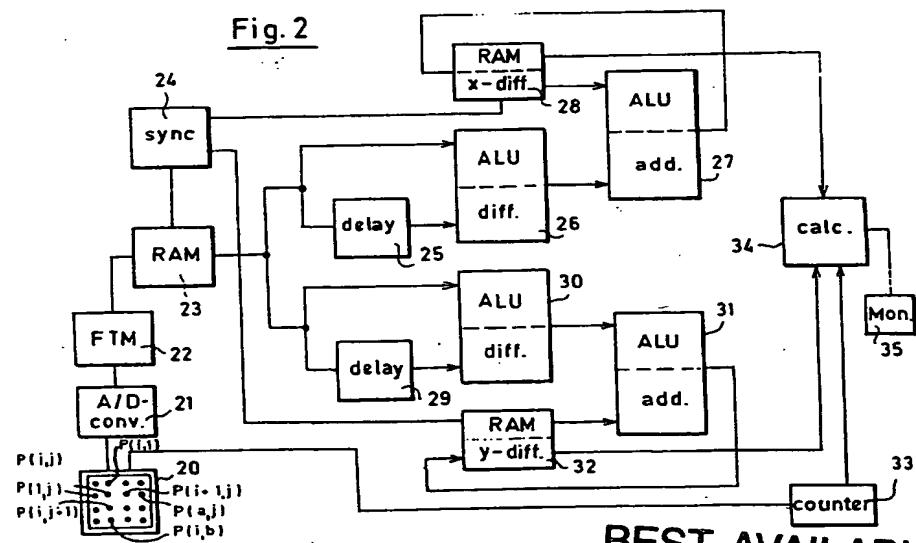
(72) Erfinder: Freischlad, Klaus, dr.  
Brandweg 4  
W-7080 Aalen(DE)

(54) Verfahren und Anordnung zur optischen Untersuchung von Prüflingen.

(57) Beschrieben sind Verfahren und Anordnungen  
zur optischen Untersuchung von Prüflingen, die eine  
schnelle Mittelung über eine Vielzahl von Kamerabildern  
in Videoechtzeit ermöglichen. Eine Kamera (9,  
18) nimmt ein Interferogramm oder das Bild eines  
projizierten Streifenmusters auf. Anschließend werden  
die Differenzen der Phasenwerte benachbarter

Datenpunkte in Differenzierern (26, 30) modulo- $2\pi$   
berechnet und diese Differenzen mehrerer Kamerabilder  
in Addierern (27, 31) aufaddiert. Erst nachdem  
diese Differenzen der Phasenwerte der gewünschten  
Anzahl an Kamerabildern aufaddiert sind, wird eine  
einige Sprungstellenbeseitigung durchgeführt.

EP 0 453 977 A3



BEST AVAILABLE COPY